UNIVERSITE IBN ZOHR
FACULTE DES SCIENCES
AGADIR



جامعة ابن زهر
كليــــة العلـــــوم
أكاديـــر

FILIÈRE : SMP2 - SMC2 – SM2

MODULE : PHYSIQUE 2

ELEMENT DE MODULE : THERMODYNAMIQUE

SUJETS D'EXAMENS DE THERMODYNAMIQUE AVEC SOLUTIONS

Pr. : K. MAHDOUK

SOMMAIRE

LES EPREUVES

Contrôle N°1. Année 2003 - 2004 3
Examen de la Session Normale. Année 2003 - 2004 4
Examen de la Session de Rattrapage. Année 2003 - 2004 5
Examen de la Session Normale. Année 2004 - 2005 7
Examen de la Session de Rattrapage. Année 2004 - 2005 9
Examen de la Session Normale. Année 2005 - 2006 10
Examen de la Session de Rattrapage. Année 2005 - 2006 12

LES SOLUTIONS

Examen de la Session de Rattrapage. Année 2003 - 2004 14
Examen de la Session Normale. Année 2004 - 2005 16
Examen de la Session de Rattrapage. Année 2004 - 2005 18
Examen de la Session Normale. Année 2005 - 2006 20

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
CONTROLE N°1. ANNEE : 2003 – 2004

Problème I :

Une mole d'un gaz parfait subit un cycle, de transformations, réversible composé de :

- Une compression isochore *AB*, amenant le système de l'état *A* (P_A,V_A,T_A) à l'état *B* $(P_B,V_A=V_B,T_B)$;
- Une détente isotherme *BC*, amenant le système de l'état *B* à l'état *C* $(P_C,V_C = 2V_A,T_C = T_B)$;
- Une transformation isobare *CA*, amenant le système de l'état *C* à son état initial *A*.

1) Représenter ce cycle de transformations dans un diagramme de Clapeyron (P,V).

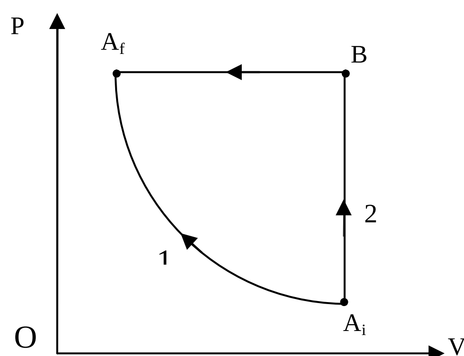
2) Calculer en fonction de P_A et V_A ; la pression P_B et la température T_B.

3) Pour chaque transformation du cycle, calculer en fonction de P_A, V_A, C_p et C_v les travaux (W_{AB}, W_{BC} et W_{CA}).

4) En déduire le travail total W_T échangé au cours du cycle. Préciser son signe et conclure.

Problème II :

On comprime de manière réversible une mole d'un gaz parfait diatomique dont l'état initial est caractérisé par une température T_i et une pression P_i. Le gaz se retrouve à un état final où la température est $T_f = T_i$ et la pression $P_f > P_i$.



Cette compression peut se produire de deux façons différentes décrites dans le diagramme de Clapeyron ci-contre :

- la première suivant le chemin 1 : A_iA_f
- la deuxième suivant le chemin 2 : A_iBA_f

1) Décrire la nature des transformations subies par le gaz le long de chaque chemin.

2) a) Exprimer, en fonction de T_i, P_i, P_f et R, le travail échangé par le système au cours des transformations :

- A_iA_f suivant le chemin 1,
- AiB,
- BA_f

3) sachant que l'énergie interne et les capacités calorifiques de ce gaz sont respectivement égales à **:**

$U = \frac{5}{2}nRT$ **,** $C_v = \frac{5}{2}nR$ et $C_p = \frac{7}{2}nR$.

- donner la signification du coefficient $\frac{5}{2}$ figurant dans l'expression de l'énergie interne.
- Déduire la variation de l'énergie interne du gaz, entre l'état initial et l'état final, le long des deux chemins. Conclure.

4) Calculer les quantités de chaleur échangées par le système au cours des trois transformations de la question **2)**.

5) En appliquant le premier principe de la thermodynamique, calculer la variation de l'énergie interne le long du chemin 2. Conclure

6) Considérons maintenant que la transformation A_iA_f **le long du chemin 1** est irréversible. Calculer le travail $W^{irr}_{Ai\to Af}$ échangé par le système au cours de cette transformation.

b) Comparer $W^{irr}_{Ai\to Af}$ au travail $W^{rev}_{A_i\to A_f}$ calculé le long du même chemin dans la question 2)a).

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
SESSION NORMALE. ANEE : 2003 - 2004

I - __Questions de cours :__

Une mole d'un fluide considéré comme un gaz parfait, parcourt un cycle ditherme réversible. Ce fluide échange les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 respectivement avec une source chaude de température T_1 et une source froide de température T_2 et un travail W avec le milieu extérieur.

1) Préciser les signes de Q_1, Q_2 et W dans le cas où le cycle est celui :
- **a)** d'une machine frigorifique ;
- **b)** d'une pompe à chaleur ;
- **c)** d'un moteur thermique.

2) Faire un schéma expliquant le principe de fonctionnement dans chaque cas.

3) Ecrire, en fonction de Q_1 et Q_2 puis de T_1 et T_2, les expressions de l'efficacité e d'une machine frigorifique et de la performance p (ou efficacité) d'une pompe à chaleur, ainsi que le rendement r d'un moteur thermique.

4) Montrer que la performance d'une pompe à chaleur irréversible p_{irr} est inférieure à celle d'une pompe à chaleur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources.

II – __Problème :__

On considère maintenant un cycle 1→2→3→4 (cycle d'Ericsson) composé des transformations réversibles suivantes :
- **1-2 :** compression isotherme telle que $T_1 = T_2$
- **2-3 :** détente isobare telle que $P_2 = P_3$
- **3-4 :** détente isotherme telle que $T_3 = T_4$ ($T_3 > T_1$)
- **4-1 :** compression isobare telle que $P_4 = P_1$ ($P_1 < P_2$)

Ce cycle a été appliqué à des moteurs, destinés à la propulsion navale, dans lesquels de l'air considéré comme un gaz parfait parcourt le cycle dans le sens moteur.

1) Représenter dans le diagramme (P, V) ce cycle de transformations.

2) Exprimer, en fonction de n, R, γ, T_1, T_3, P_1 et P_2, le travail et la chaleur reçus par le fluide au cours des quatre étapes suivantes :
- **a)** $W_{1\text{-}2}$ et $Q_{1\text{-}2}$ pour la transformation 1 → 2 ;
- **b)** $W_{2\text{-}3}$ et $Q_{2\text{-}3}$ pour la transformation 2 → 3 ;
- **c)** $W_{3\text{-}4}$ et $Q_{3\text{-}4}$ pour la transformation 3 → 4 ;
- **d)** $W_{4\text{-}1}$ et $Q_{4\text{-}1}$ pour la transformation 4 → 1.

3) En déduire, en fonction de n, R, γ, T_1, T_3, P_1 et P_2, l'expression :
- **a)** de la quantité de chaleur Q_r reçue par le système au cours du cycle ;
- **b)** de la quantité de chaleur Q_c cédée par le système au cours du cycle ;
- **c)** du travail total W échangé avec le milieu extérieur. Préciser son signe.
- **c)** du rendement r de ce cycle moteur.

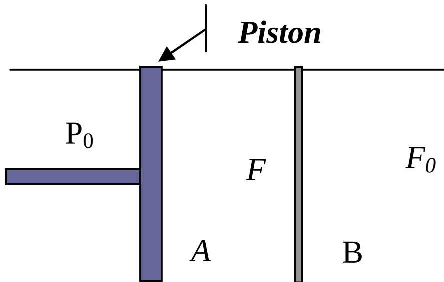
4) Calculer, en fonction de n, R, γ, T_1, T_3, P_1 et P_2, la variation d'entropie ΔS qui accompagne chaque transformation de ce cycle.

5) En déduire la variation d'entropie ΔS_{cycle} relative à ce cycle.

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
SESSION DE RATTRAPAGE. ANNEE : 2003 - 2004

Exercice I :

Un cylindre horizontal est fermé à l'une de ses extrémités par une paroi fixe F_0 et à l'autre l'extrémité par un piston qui peut coulisser sans frottement le long du cylindre. Le cylindre est séparé en deux compartiments A et B par une paroi fixe *F*. Sur la face extérieure du piston s'exerce la pression atmosphérique P_0 qu'on suppose uniforme et constante.



1) Dans la situation initiale le compartiment A de volume $V_A = V_0$ contient un *gaz parfait diatomique* à la température T_0, le compartiment B de volume V_B est vide.

Calculer le nombre ***n*** de moles dans le cylindre en fonction de P_0, V_0 et T_0

2) Les parois du cylindre et le piston sont imperméables à la chaleur et de capacités calorifiques négligeables.

On perce un trou dans la paroi fixe *F*. Le volume V_B est suffisamment grand pour que la pression finale du gaz soit inférieure à P_0.

a) Expliquer pourquoi, dans l'état final, le volume du compartiment A sera nul ($V_A = 0$).

b) Calculer le travail W_1 échangé avec l'extérieur par le gaz en fonction de P_0 et V_0 puis en fonction de *n* ; R, $\gamma = \dfrac{C_p}{C_V}$, T_1 et T_0.

c) En déduire l'expression de :

- la température finale T_1 en fonction de γ et T_0,
- la pression finale P_1 du gaz

Exercice II :

Deux systèmes **isolés** notés 1 et 2, initialement à température T_1 et T_2, de capacités calorifiques à pression constante C_{P1} et C_{P2} sont mis en contact thermique, la pression restant constante au cours de l'évolution. Au bout d'un temps suffisamment long, il s'établit un état d'équilibre où les deux systèmes ont même température T_f.

1) La transformation est-elle réversible ? Justifier votre réponse.

2) a) Calculer les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 échangées par chacun des systèmes

b) en déduire que la température finale $T_f = \dfrac{C_{P1}T_1 + C_{P2}T_2}{C_{P1} + C_{P2}}$.

3) Déterminer les expressions des variations d'entropie ΔS_1 et ΔS_2 de chacun des deux systèmes et ΔS de l'ensemble des deux systèmes.

4) a) On se place dans le cas $T_1 > T_2$, quels sont les signes de ΔS_1 et ΔS_2 et de ΔS ?.

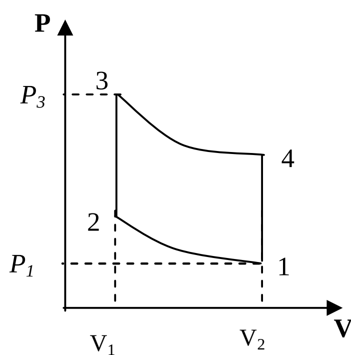
b) Déterminer l'expression de ΔS dans le cas $C_{P1} = C_{P2} = C_P$, en fonction de C_p, T_1, T_2.

5) On étudie le cas où le système **2** a une capacité calorifique " infinie " (atmosphère, eau d'un lac, ...).

a) quelles sont les nouvelles expressions de T_f, Q_1 et Q_2

Exercice III :

Soit une machine utilisant comme fluide l'air assimilé à un gaz parfait diatomique. Cette machine fonctionne réversiblement selon le *cycle de Stirling* représenté sur la figure ci-après.
Il est composé de deux isothermes 3→4 et 1→2 et de deux isochores 2 →3 et 4→1 (voir figure)



A l'état 1, la pression est $P_1 = 10^5 \, N.m^{-2}$ et la température est $T_1 = T = 300K$.

A l'état 3, la pression est $P_3 = 4 \times 10^5 \, N.m^{-2}$ et la température est $T_3 = T' = 600K$.

1) Déterminer les expressions des quantités de chaleur Q_{12}, Q_{23}, Q_{34} et Q_{41} échangées par une mole de gaz au cours d'un cycle.

2) déterminer les expressions des travaux W_{12} et W_{34} échangés par une mole de gaz au cours du cycle ainsi que le travail W total.

3) a) Déduire de ces résultats le rendement thermodynamique du cycle de Stirling.

b) Comparer ce rendement à celui que l'on obtiendrait si la machine fonctionnait selon le cycle de Carnot entre les mêmes sources aux températures *T* et *T'*.

c) Expliquer la différence.

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
SESSION NORMALE. ANNEE : 2004 - 2005

Questions de cours :

1) donner la définition :
a) d'un un état d'équilibre.
b) d'une transformation quasi-statique
c) d'une transformation réversible

2) **a)** rappeler la définition de l'énergie interne U.
b) à quoi correspond cette énergie dans le cas d'un gaz parfait.
c) donner l'expression de l'énergie interne d'un gaz parfait diatomique.

3) **a)** Écrire l'énoncé du premier principe
b) rappeler son expression différentielle.

Exercice I:

On considère **un gaz,** de capacités calorifiques C_v et C_p respectivement à volume et à pression constantes, subissant une transformation **réversible**. On suppose qu'au cours d'une transformation infinitésimale, ce gaz échange avec le milieu extérieur une quantité de chaleur élémentaire δQ et un travail élémentaire δW .

1) On suppose que la transformation est adiabatique réversible

a) déterminer $\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab}$ en fonction des coefficients calorimétriques μ et λ

b) Établir la relation entre $\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$ et $\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab}$

On rappelle que les expressions des coefficients calorimétriques μ et λ s'écrivent :

$$\mu = C_P \left.\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P \text{ et } \lambda = C_V \left.\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$$

Et que de manière générale : $$\frac{1}{\left.\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z} = \left.\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z \quad et \quad que : \left.\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left.\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left.\frac{\partial z}{\partial x}\right)_z = -1$$

c) Dans le cas ou le gaz est parfait, écrire l'expressions de δQ lorsque les variables :
- V et T sont indépendantes.
- T et P sont indépendantes.
- P et V sont indépendantes.

2) déterminer $\left.\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$ lorsque la transformation est réversible isotherme

3) En utilisant l'équation **1) b)**, déduire l'équation d'état du gaz pour une transformation adiabatique réversible

4) Supposons maintenant que le gaz parfait subit une détente réversible l'amenant d'un état initial A_1 (P_1,V_1) vers un état final ayant un volume V_2.

a) Sur un même diagramme de *Clapeyron*, représenter l'allure de cette transformation lorsqu'elle est :

i) adiabatique ;
ii) isotherme.

b) **i)** Représenter graphiquement les travaux W_T et W_{adia} correspondants.
ii) comparer W_T et W_{adia}.

Exercice II:

On considère **un gaz parfait,** de capacités calorifiques C_v et C_p respectivement à volume et à pression constantes, subissant une **détente adiabatique réversible** l'amenant d'un état. A_1 (T_1,V_1) vers un état final A_2 (T_2,V_2).

1) **a)** Établir l'expression du travail, W_{adia}, échangé par le système, en fonction de C_v, T_1 et T_2

b) Que devient cette expression lorsque la détente adiabatique est irréversible ?

2) **a)** En utilisant la relation de *Mayer* entre C_p et C_v, écrire l'expression du travail W_{adia} en fonction de n, R, γ, T_1 et T_2.

b) En utilisant l'équation d'état, déterminer l'expression du travail W_{adia} en fonction de n, R, γ, T_2, et $\frac{V_2}{V_1}$.

3) Supposons maintenant que le gaz parfait subit une **détente isotherme réversible** à la température $\boldsymbol{T}$,

a) établir l'expression du travail W_T échangé par le système, en fonction de n, R, T, et $\frac{V_2}{V_1}$.

b) En déduire l'expression de la quantité de chaleur Q_T échangée en fonction de n, R, T, et $\frac{V_2}{V_1}$.

4) Supposons maintenant que la détente effectuée par le gaz parfait est isobare et irréversible,

a) Donner l'expression de la variation de l'énergie interne ΔU du gaz au cours de cette transformation.

b) Écrire l'expression de la quantité de chaleur Q_P^{irr} échangée par le gaz.

c) En déduire l'expression du travail W_P^{irr} échangé par le système, en fonction de n, R, T_1, et T_2.

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
SESSION DE RATTRAPAGE. ANNEE : 2004-2005

Questions de cours :

I) Un gaz parfait parcourt un cycle ditherme **réversible** au cours duquel il échange un travail W, avec le milieu extérieur, une quantité de chaleur Q_1 avec la source chaude (à la température T_1) et une quantité de chaleur Q_2 avec la source froide (à la température T_2).

Préciser les signes de Q_1 *et* Q_2 et W dans le cas ou le cycle est celui :

a) d'une pompe à chaleur.
b) d'une machine frigorifique.
c) d'un moteur thermique.

II) **a)** Écrire, l'expression de la quantité de chaleur élémentaire δQ échangée par un gaz parfait au cours d'une transformation infinitésimale en fonction des variables T et V.

b) En déduire l'expression de la variation élémentaire d'entropie dS du gaz parfait au cours de cette transformation infinitésimale.

c) Rappelez comment calcule t-on la variation d'entropie ΔS d'u gaz parfait au cours d'une transformation réelle entre un état d'équilibre initial (T_i, V_i) et un état d'équilibre final (T_f, V_f).

Problème :

On considère un gaz parfait qui décrit un *cycle de Carnot* ABCDA constitué de :

- une branche AB représentant une compression isotherme à la température T_2 amenant le système du volume V_A au volume V_B ($V_A > V_B$).
- une branche BC représentant une compression adiabatique amenant le système du volume V_B au volume V_C ($V_B > V_C$).
- une branche CD représentant une détente isotherme à la température T_1 amenant le système du volume V_C au volume V_D.
- une branche DA représentant une détente adiabatique ramenant le système à son état initial A.

1) Construire le cycle dans un diagramme de *CLAPEYRON*.

2) **a)** Établir les expressions des travaux W_{AB}, W_{CD}, W_{BC} et W_{DA} échangés par le système en fonction de n, R, C_V, T_1, T_2, V_A, V_B, V_C et V_D.

b) En déduire la quantité de chaleur Q_{AB} en fonction de n, R, T_2, V_A et V_B et la quantité de chaleur Q_{CD} en fonction de n, R, T_1, V_C et V_D. Ces chaleurs sont échangées avec les deux sources de chaleur

c) Quels sont les signes de Q_{AB} et Q_{CD}? Laquelle de ces deux chaleurs est échangée avec la source chaude ? (Justifiez votre réponse).

3) **a)** Écrire l'expression du rendement r du cycle en fonction de Q_{AB} et Q_{CD}, puis en fonction de T_1, T_2, V_A, V_B, V_C et V_D.

b) En utilisant l'équation caractéristique de la transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait (liant la température et le volume), montrer que : $\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$.

c) En déduire l'expression du rendement en fonction de T_1 et T_2.

4) **a)** Établir les expressions des variations d'entropie ΔS_{AB}, ΔS_{BC}, ΔS_{CD} et ΔS_{DA} en fonction de n, R, V_A, V_B, V_C et V_D.

b) En déduire la variation de l'entropie du gaz parfait, ΔS_{cycle}, au cours de ce cycle.

c) Retrouver ce résultat en utilisant le deuxième principe de la thermodynamique.

5) Donner les paramètres des états A, B, C et D en fonction de T_1, T_2, V_A et V_B.

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
SESSION NORMALE. ANNEE : 2005-2006

(Les exercices I et II sont indépendants)

Exercice I ***(durée conseillée 30 mn)***

On considère n moles de gaz parfait de chaleur spécifique molaire à volume constant c_v et de constante γ.

1) Exprimer c_v en fonction de γ et R (R : Constante des gaz parfaits)

2) Pour une transformation infinitésimale qui fait passer le gaz de l'état P, V *et* T à l'état $P+dP$, $V+dV$ *et* $T+dT$, écrire l'expression de la quantité de chaleur δQ échangée avec le milieu extérieur dans le cas ou T et V sont des variables indépendantes.

3) **a)** Démontrer que, dans le cas d'une transformation adiabatique réversible, l'état du gaz est décrit, par l'équation d'état :

$$TV^{\gamma-1}=Cte.$$

b) En déduire que cette équation peut aussi s'écrire sous la forme :

$PV^{\gamma} = Cte$ ou encore $TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = Cte.$

c) Montrer, **par un calcul direct**, que le travail W échangé par le gaz parfait au cours de cette transformation faisant passer le gaz de l'état (P_1, V_1, T_1) à l'état (P_2, V_2, T_2) s'écrit :

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1}$$

d) En déduire W en fonction de n, R, γ, T_1 et T_2.

e) Quelle est la valeur de la variation d'entropie au cours de cette transformation ?

On veut maintenant effectuer une transformation **adiabatique irréversible** en partant du même état initial (P_1, V_1, T_1) .

4) **a)** Les expressions des questions 3) a) et 3) c) restent-elles valables ? Justifier.

b) Quelle est le signe de la variation d'entropie ? Justifier

c) En déduire que l'état final est différent de celui de la transformation réversible ?

Exercice II ***(durée conseillée 1 heure)***

On considère une machine ditherme fonctionnant entre deux sources de chaleur de températures respectives T_1 = 300 K et T_2 = 280 K**.** Le fluide de cette machine, assimilé à un gaz parfait de n moles et de constante γ, décrit un cycle ditherme composé de transformations réversibles suivantes :

A→ B : Compression adiabatique de V_A à V_B
B→C : Compression isotherme de V_B à V_C
C →D : Détente adiabatique de V_C à V_D
D →A : Détente isotherme de V_D à V_A ($V_A > V_D$)

1)- **a)** Représenter ce cycle dans le diagramme de Clapeyron.

b) Qu'appelle-t-on ce cycle ?

c) Que représente l'aire du cycle dans le diagramme ***(P,V)***

d) En déduire la nature de ce cycle ditherme.

2)- **a)** Déterminer les expressions des travaux échangés lors de ces transformations en fonction de T_1, T_2, V_A, V_B, V_C *et* V_D.

b) En déduire le travail total W échangé par le système lors du cycle. Application numérique.

3)- a) Déterminer les quantités de chaleur échangées lors de chacune de ces transformations. On notera **Q_1 et Q_2** les quantités de chaleur échangées par le système respectivement avec les sources de températures T_1 *et* T_2.

b) Retrouver l'expression du travail *W* de la question 2- b)

4)- a) Déterminer la variation d'entropie du système pour chacune des transformations du cycle.

b) En déduire la variation d'entropie ΔS du cycle,

5)- a) Exprimer le rapport $\frac{gain}{Dépense}$ de cette machine en fonction de Q_1 et Q_2 . Etudier les cas possibles

b) En utilisant la relation de Clausius exprimer ce rapport en fonction de T_1 et T_2. Application numérique.

6)- a) Déterminer les variations d'entropie ΔS_1 et ΔS_2 des sources de chaleur de températures respectivement T_1 et T_2.

b) Calculer la variation d'entropie totale $\Delta S_T = \Delta S_{système} + \Delta S_1 + \Delta S_2$. Conclusion

7)- On suppose que la transformation BC est irréversible

a) Quelle est l'expression de la variation d'entropie ΔS_{BC} **?**

b) Déterminer alors l'expression de l'entropie créée au cours de cette transformation.

On donne : n =1**,** R = 8,31 $J.mol^{-1}.K^{-1}$; γ = 1,4

ÉPREUVE DE THERMODYNAMIQUE
SESSION DE RATTRAPAGE. ANNEE : 2005-2006

Questions de cours :

1) Définir et écrire l'expression de l'énergie interne U d'un gaz parfait constitué de N particules.
2) On considère un système, de chaleur massique à volume constant Cv et à pression constante Cp, qui subit une transformation infinitésimale réversible au cours de laquelle il échange une quantité de chaleur δQ avec le milieu extérieur.

a) Ecrire l'expression de δQ en fonction des couples de variables indépendantes (T, V) et (T, P).
b) Que devient cette expression si le gaz considéré est un gaz parfait.

3) Ecrire la relation de Mayer d'un gaz parfait en fonction de ses chaleurs massiques à volume constant Cv et pression constante Cp.
4) Un gaz parfait dans un état d'équilibre initial A (P_A, V_A) subit :

- soit une compression isotherme réversible l'amenant vers un état final B (P_B, V_B)
- soit une compression adiabatique réversible l'amenant vers un état final C (P_C, V_C=V_B)

a) Représentez dans un même diagramme de *Clapeyron* (P, V), l'allure de ces deux transformations.
b) Représentez graphiquement les travaux $W_{\text{isotherme}}$ et $W_{\text{adiabatique}}$ correspondants. Les comparer.

Exercice :

Un gaz parfait dont l'état d'équilibre initial, I, caractérisé par les coordonnées thermodynamiques (T_i, P_i, V_i) subit une détente réversible et se retrouve dans un état final, F, caractérisé par les coordonnées thermodynamiques (T_f, $P_f < P_i$, V_f).
Cette détente peut s'effectuer suivants deux chemins (*C1* et *C2*) différents :

- *C1*: une transformation *IF* où l'état final est caractérisé par une température $T_f = T_i$.
- *C2* : une transformation isobare *IA* suivie d'une transformation isochore *AF*.

1) Représenter sur le même diagramme de *Clapeyron* les deux états extrêmes I et F ainsi que les deux chemins, décrits ci-dessus, pour aller de l'état I à l'état F.
2) a) Exprimer, en fonction de T_i, P_i, P_f et R, le travail échangé par le système au cours des transformations :

- *IF* suivant le chemin 1 (C1) : W_{IF}
- *IA :* W_{IA}
- *AF :* W_{AF}

b) Comparer W_{IF} et W_{IA} sachant que $1-x > \ln x$ lorsque $x > 1$.
c) Comparer les travaux échangés par le gaz le long des chemins *C1* et *C2*. Conclure.

3) Sachant que l'énergie interne de ce gaz est égale à : $U = \frac{3}{2}nRT$.

a) Déduire la variation de l'énergie interne du gaz, entre l'état initial et l'état final, le long des deux chemins. Conclure.
b) En déduire en appliquant le premier principe, l'expression de la quantité de chaleur Q_{IF} échangée par le système le long du chemin 1 (*C1*).

4) Exprimer, en fonction de T_i, P_i, P_f et R, les quantités de chaleur Q_{IA} et Q_{AF} échangées par le système au cours des transformations du chemin 2. Les capacités calorifiques de ce gaz sont respectivement
égales à : $C_v = \frac{3}{2}nR$ et $Cp=\frac{5}{2}nR$

5) Considérons maintenant que la transformation *IF le long du chemin 1* est irréversible. Calculer le travail W_{IF}^{irr} échangé par le système au cours de cette transformation.

SOLUTIONS DES EPREUVES

SOLUTION DE L'EPREUVE DE LA SESSION DE RATTRAPAGE 2003-2004

EXERCICE I :

1) Nombre de mole : PV=RT ===> $n = \frac{P_0 V_0}{R T_0}$

2) **a)** la pression P_0 est supérieur à P, le piston va se déplacer jusqu'à ce que $V_A = 0$. le piston est accolé avec la paroi F.

b) le travail échangé avec l'extérieur pour le gaz est :

- d'après $\delta W = -p_{ext} dV$ $\quad W = -P_{ext} \int dV = P_0 V_0$

- d'après $dU = \delta W + \delta Q = \delta W$ (transformation adiabatique)

$$dU = dW = nC_v dT \quad ====> \quad W = nC_v (T_1 - T_0)$$

$$W = n \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_0)$$

c) $W = n \frac{R}{\gamma - 1} (T_1 - T_0) = P_0 V_0$

===> $\frac{1}{T_0}(T_1 - T_0) = \gamma - 1$ ===> $T_1 = \gamma T_0$

- $P_1 V_B = nRT_1$; $P_1 V_B = nR\gamma T_0 = \gamma P_0 V_0$

$$P_1 = \frac{\gamma P_0 V_0}{V_B}$$ Ou toute autre expression équivalentes

- V_{Bmin} à ne pas traiter

EXERCICE II :

1) la transformation est irréversible, on ne peut pas retrouver l'état initial spontanément et suivant le même chemin

2) **a)** $\delta Q = C_p dT$ ===> $Q_1 = C_{p1}(T_f - T_1)$ *et* $Q_2 = C_{p1}(T_f - T_2)$

b) $Q_1 = -Q_2$

====> $Q_1 = C_{p1}(T_f - T_1) = -Q_2 = -C_{p1}(T_f - T_2)$

===> $T_f = \frac{C_{p1} T_1 + C_{p2} T_2}{C_{p1} + C_{p2}}$

3) $dS = \frac{\delta Q}{T}$ ===> $\Delta S = \int C_P \frac{dT}{T}$ $\quad \Delta S_1 = C_{P1} \ln \frac{T_f}{T_1}$ $\quad \Delta S_1 = C_{P2} \ln \frac{T_f}{T_2}$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = C_{P1} \ln \frac{T_f}{T_1} + C_{P2} \ln \frac{T_f}{T_2}$$

4) **a)** $T_1 > T_2$ $\quad T_2 < T_f < T_1$ $\quad \Delta S_1 = C_{P1} \ln \frac{T_f}{T_1} < 0$ $\quad \Delta S_2 = C_{P1} \ln \frac{T_f}{T_2} > 0$

Transformation irréversible avec un système isolé ===> $\Delta S > 0 \;\; \forall \;\; T_1 \; ou \; T_2$

b) $\Delta S = C_P \ln \frac{T_f}{T_1} + C_P \ln \frac{T_f}{T_2} = C_P \left[\ln \frac{T_f}{T_1} + \ln \frac{T_f}{T_2} \right]$ ====> $\Delta S = C_P \left[\ln \frac{T_f^{\,2}}{T_1 T_2} \right]$

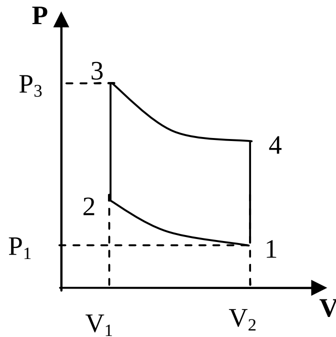
$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2}$ ====> $\Delta S = C_P \ln \frac{[T_1 + T_2]^2}{4 T_1 T_2}$

5) **a)** $C_{P2} \to \infty$; $T_f \to T_2$; $Q_1 = -Q_2 = C_P(T_2 - T_1)$

b) A ne pas traiter

EXERCICE III :

1) $dQ = CvdT + ldV$



$dQ_{12} = ldV$ *isotherme*

$dQ_{12} = PdV$ *gaz parfait*

$$Q_{12} = \int_{V2}^{V1} PdV = \int_{V2}^{V1} nRT\frac{dV}{V} \quad ; \quad Q_{12} = nRT\ln\frac{V_1}{V_2}$$

On peut retrouver ce résultat à partir de l'expression du travail

$dQ_{23} = C_v dT$ *isochore* ====> $dQ_{23} = C_v(T' - T)$

$$Q_{34} = \int_{V1}^{V2} PdV = \int_{V1}^{V2} nRT'\frac{dV}{V} \quad ===> \quad Q_{34} = nRT'\ln\frac{V_2}{V_1}$$

$dQ_{41} = C_v dT$ *isochore* ====> $dQ_{41} = C_v(T - T')$

2) l'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend que de la température $\Delta U = 0$ dans le cas d'une isotherme donc $Q = -W$

$$W_{12} = nRT\ln\frac{V_2}{V_1} \qquad W_{34} = nRT'\ln\frac{V_1}{V_2} \qquad W = nR\ln\frac{V_1}{V_2}(T' - T)$$

3)a) le rendement $\rho = 1 + \dfrac{Q_{12}}{Q_{34}} = 1 + \dfrac{nRT\ln\frac{V_1}{V_2}}{nRT'\ln\frac{V_2}{V_1}} = 1 - \dfrac{T}{T'}$

b) $\rho = 1 - \dfrac{T}{T'} = \rho_{carnot}$

c) Pas de différence.

SOLUTION DE L'EPREUVE DE LA SESSION NORMALE 2004-2005

Questions de cours :

1) **a)** Un système se trouve dans un état d'*équilibre* si les variables d'état qui définissent son état ne varient pas au cours du temps,

(équilibre thermique) + (équilibre mécanique)).

b) Une transformation réversible est une transformation qui se fait par une succession d'états d'équilibres infiniment voisins,

2) **a)** L'énergie interne U d'un système est définie comme la somme des énergies cinétiques E_{ci} et potentielles E_{pi} de toutes les particules formant le système.

$$\mathrm{U = Ec + Ep} = \sum_{i=1}^{N}\left(E_{ci} + E_{pi}\right)$$

E_{ci} = Énergie cinétique (translation ⊕ rotation) de chaque particule:

b) L'énergie interne ***U*** d'un gaz parfait est la **somme de l'énergie cinétique E_{ci}** (translation ⊕ rotation) de toutes les particules le constituant :

$$U = \sum_{i}^{N} E_{ci}$$

c) $U = E_c^{trans} + E_c^{rot} = \frac{3}{2}NkT + NkT$ ==> $U = \frac{5}{2}NkT$ ==> $U = \frac{5}{2}n\mathcal{N}kT = U = \frac{5}{2}nRT$

3) **a)** le 1[ier] principe s'écrit : $\Delta U = W + Q$

b) l'expression différentielle du 1[ier] principe est : $dU = \delta W + \delta Q$

Exercice 1 :

1) **a)** pour une transformation adiabatique, on a : $\delta Q = \mu\, dV + \lambda\, dP = 0$

Donc : $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab} = -\frac{\mu}{\lambda}$

b) $$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab} = -\frac{C_p\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P}{C_v\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V} = -\gamma\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = -\gamma\frac{-1}{\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T} = \gamma\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$$

==> $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab} = \gamma\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$

c)

$$\begin{cases} \delta Q = C_v dT + PdV = 0 \\ \delta Q = C_p dT - VdP = 0 \\ \delta Q = C_V \frac{V}{nR} dP + C_P \frac{P}{nR} dV = 0 \end{cases}$$

2) On a : $PV = nRT$ donc : $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = \frac{\partial}{\partial V}\frac{nRT}{V} = -\frac{nRT}{V^2}$

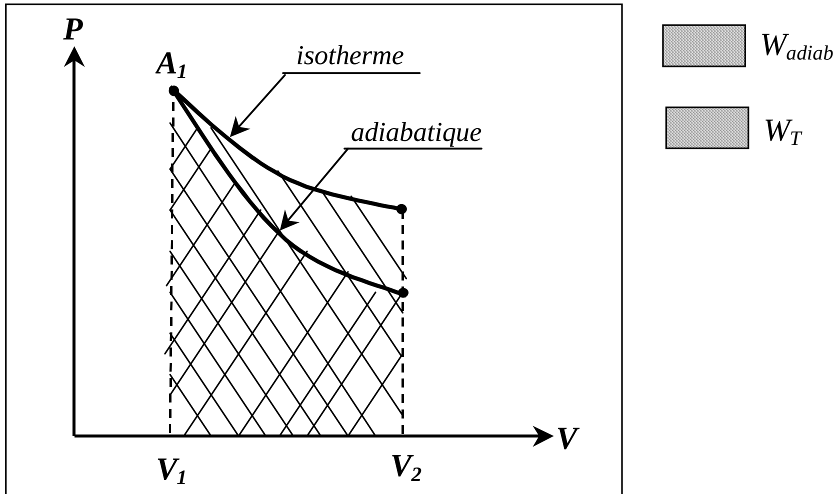
==> $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -\frac{P}{V}$

3) $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab} = \gamma \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T$

Or : $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = -\frac{P}{V}$ ==> $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{adiab} = -\gamma \frac{P}{V}$ ==> $\frac{dP}{P} = -\gamma \frac{dV}{V}$

==> $\ln P = -\gamma \ln V + Cte \Rightarrow \ln P + \gamma \ln V = Cte$ ==> $\ln PV^Y = Cte \Rightarrow PV^Y = Cte$

4) a) et b)



Ainsi : $W_{adiab} < W_T$

<u>Exercice 2 :</u>

1) **a)** $Q = 0$ donc le 1[ier] principe s'écrit : $W_{adiab} = \Delta U = C_v(T_2-T_1)$

b) $W_{adiab}^{irrév} = \Delta U = C_v(T_2 - T_1)$

2) **a)** la relation de Mayer s'écrit : $C_p - C_v = nR \Rightarrow C_v(\gamma-1) = nR$

Ainsi : $W_{adiab} = \frac{nR}{Y-1}(T_2 - T_1)$

b) $W_{adiab} = \frac{nR}{Y-1} T_2 (1-\frac{T_1}{T_2})$ or $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow W_{adiab} = \frac{nR}{Y-1} T_2 (1-\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1})$

3) **a)** $W_T = -\int_{V1}^{V2} PdV = -nRT\int_{V1}^{V2}\frac{dV}{V} = -nRTLn\frac{V_2}{V_1}$

b) L'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend que de la température et reste, donc, constante au cours d'une transformation isotherme *:*

$$\Delta U = W_T + Q_T = 0 \Rightarrow Q_T = -W_T$$

soit *:* $Q_T = -W_T = nRTLn\frac{V_2}{V_1}$

4) **a)** $\Delta U = C_v(T_2 - T_1)$ (puisque U est une fonction d'état)

b) $Q_p^{irrév} = \Delta H = C_p (T_2 - T_1)$

c) $W_p^{irrév} = \Delta U - Q_p^{irrév} = C_v (T_2 - T_1) - C_p (T_2 - T_1) = -nR(T_2 - T_1)$

SOLUTION DE L'EPREUVE DE LA SESSION DE RATTRAPAGE 2004-2005

<u>Questions de cours</u> :

1)

a) pompe à chaleur : $Q_1 < 0$ $Q_2 > 0$ $W > 0.$

b) d'une machine frigorifique : $Q_1 < 0$ $Q_2 > 0$ $W > 0.$

c) d'un moteur thermique : $Q_1 > 0$ $Q_2 < 0$ $W < 0.$

2)

a) $\delta Q = C_v\, dT + PdV$

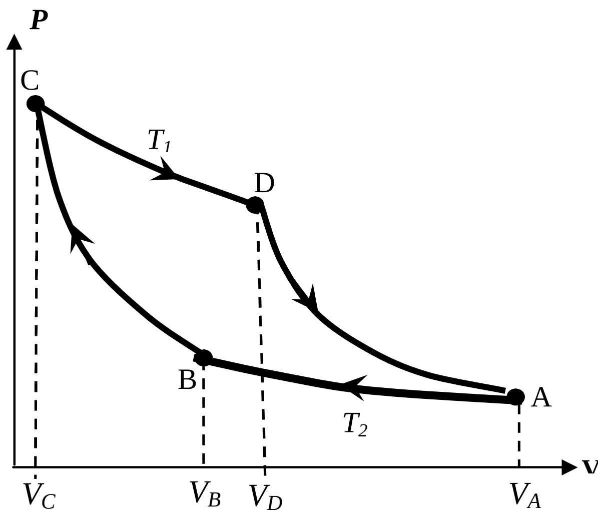
b) $dS = \dfrac{\delta Q^{rév}}{T} \Longrightarrow dS = C_v \dfrac{dT}{T} + nR \dfrac{dV}{V}$

c) Pour calculer ΔS d'un gaz parfait au cours d'une transformation réelle entre un état initial (T_i, V_i) et un état final (T_f, V_f), il suffit d'intégrer *dS* *<u>à condition d'emprunter un chemin réversible</u>* (même imaginaire) entre ces 2 états :

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rév}}{T} \Longrightarrow \Delta S = C_v Ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) + nRLn\left(\frac{V_f}{V_i}\right)$$

<u>Problème :</u>

1)



2)

a) $$W_{AB} = -\int_{V_A}^{V_B} nRT_2 \frac{dV}{V} = nR\,T_2\, Ln\left(\frac{V_A}{V_B}\right)$$

$$W_{CD} = -\int_{V_C}^{V_D} nRT_1 \frac{dV}{V} = nR\,T_1\, Ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$$

$$W_{BC} = \Delta U_{BC} = C_v\ (T_1 - T_2)$$

$$W_{DA} = \Delta U_{DA} = C_v\ (T_2 - T_1)$$

b) $$Q_{AB} = -W_{AB} = nRT_2 Ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

$$Q_{CD} = -W_{CD} = nRT_1 Ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

c) $Q_{AB} < 0$ puisque $V_B < V_A$.

$Q_{CD} > 0$ puisque $V_D > V_C$.

Q_{CD} est positive, donc reçue par le système, de la source chaude.

3) a) $r = \frac{Gain}{dépense} = \frac{-W}{Q_{CD}} = \frac{Q_{AB} + Q_{CD}}{Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{AB}}{Q_{CD}}$

soit : $r = 1 + \dfrac{nRT_2 Ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}{nRT_1 Ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)} = 1 - \dfrac{T_2 Ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}{T_1 Ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}$

b) $T_C V_C^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_B}{V_C}\right)^{\gamma-1}$

$T_D V_D^{\gamma-1} = T_A V_A^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_A}{V_D}\right)^{\gamma-1}$

donc : $\left(\frac{V_A}{V_D}\right) = \left(\frac{V_B}{V_C}\right) \Rightarrow \left(\frac{V_B}{V_A}\right) = \left(\frac{V_C}{V_D}\right)$

c) D'après 3) a) et b) on peut écrire : $r = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

4) a) $\Delta S_{AB} = nRLn\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$

$\Delta S_{BC} = 0$

$\Delta S_{CD} = nRLn\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$

$\Delta S_{DA} = 0$

b) $\Delta S_{cycle} = \Delta S_{AB} + \Delta S_{BC} + \Delta S_{CD} + \Delta S_{DA} = 0$ car $\left(\frac{V_B}{V_A}\right) = \left(\frac{V_C}{V_D}\right)$

c) Pour le cycle réversible ABCDA, le 2nd principe s'écrit : $\Delta S_{cycle} = \Delta S^r + \Delta S^c$

où $\Delta S^c = 0$ (cycle réversible) et $\Delta S^r = \frac{Q_{CD}}{T_1} + \frac{Q_{AB}}{T_2}$ (cycle ditherme)

or, d'après 3)a) et b) on a : $\frac{Q_{AB}}{Q_{CD}} = -\frac{T_2}{T_1}$ c'est à dire : $\frac{Q_{CD}}{T_1} + \frac{Q_{AB}}{T_2} = 0$

donc : $\Delta S = \frac{Q_{CD}}{T_1} + \frac{Q_{AB}}{T_2} = 0$

SOLUTION DE L'EPREUVE DE
LA SESSION NORMALE 2005-2006

Exercice I

1) $c_p - c_v = R$; $(\gamma - 1)c_v = R$; $c_v = \dfrac{R}{(\gamma - 1)}$

2) $dQ = nC_v dT + ldV$; $dQ = nC_v dT + PdV$

3) a)

$$dQ = n\frac{R}{(\gamma-1)}dT + PdV = 0$$

$$n\frac{R}{(\gamma-1)}dT = -PdV = -nRTdV$$

$$\frac{dT}{(\gamma-1)} = -\frac{dV}{V} \quad ; \quad \ln T = -\ln V^{(\gamma-1)} + Cte \;,\quad TV^{(\gamma-1)} = Cte$$

b) $TV^{(\gamma-1)} = \dfrac{PV}{nR}V^{(\gamma-1)} = PV^{\gamma} = Cte$

$$T(\frac{nRT}{P})^{(\gamma-1)} = \frac{T}{V}V^{\gamma} = PV^{\gamma} = \frac{nRT}{V}-^{\gamma} \;(Cte$$

c)

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} PdV = -\int_{V_1}^{V_2}\frac{Cte}{V^{\gamma}}dV = -Cte\int_{V_1}^{V_2}V^{-\gamma}dV = -Cte\left[\frac{1}{-\gamma+1}V^{1-\gamma}\right]_{V_1}^{V_2}$$

$$= \left[\frac{Cte}{\gamma-1}V_2^{1-\gamma} - \frac{Cte}{\gamma-1}V_1^{1-\gamma}\right] = \left[\frac{P_2V_2^{\gamma}}{\gamma-1}V_2^{1-\gamma} - \frac{P_1V_1^{\gamma}}{\gamma-1}V_1^{1-\gamma}\right] = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma-1}$$

> Remarque : le calcul à partir de la variation de l'énergie interne n'est pas un calcul direct
> $$\Delta U = W + Q = W = \int_{T_1}^{T_2} nc_v dT = \frac{nR}{\gamma-1}(T_2 - T_1) = \frac{nRT_2 - nRT_1}{\gamma-1} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma-1}$$

d) $W = \dfrac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma-1} = \dfrac{nRT_2 - nRT_1}{\gamma-1} = \dfrac{nR(T_2 - T_1)}{\gamma-1}$

e) La transformation est adiabatique réversible : $dS = \dfrac{dQ^{rev}}{T} = 0$ ==> $\Delta S = 0$

4) a)

L'expression $TV^{\gamma-1}$=Cte de la question 3) a) n'est plus valable puisque sa démonstration a été faite dans le cas d'une transformation réversible.

L'expression du travail de la question 3) c) n'est pas valable : relation obtenue par l'intégration **d'une fonction continue**.

b) la transformation est irréversible :

la variation d'entropie s'écrit :

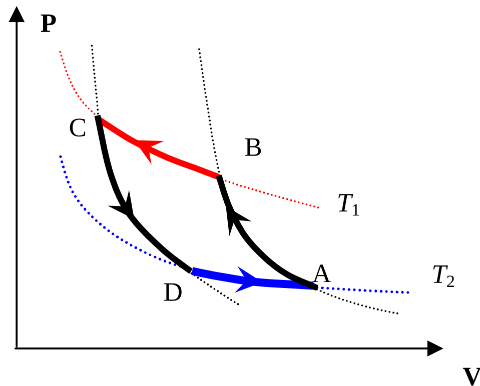
$$\Delta S = S^{Créée} + S^{échange} \qquad ou\ la\ notation \qquad \Delta S = \Delta S^{Créée} + \Delta S^{échange}$$

on sait que : $S^{échange} = \dfrac{Q^{irr}}{T_S} = 0$ *puisque* $(Q = 0)$

alors : $\Delta S^{irr} = S^{Créée} > 0$ puisque la transformation est irréversible

c) puisque l'entropie est une fonction d'état, le système n'atteindra pas le même état final de la transformation réversible.

Exercice II



a) cycle ci-contre

b) ce cycle est le cycle de Carnot

c) l'air du cycle est proportionnelle au travail échangé par le système au cours du cycle

d) le cycle est parcouru dans le sens des aiguille d'une montre :

⇨ le travail est positif

⇨ W > 0, Le cycle est récepteur

2) a) $dw = -pdV$

AB : Adiabatique : *dQ = 0* ;

$$dw = dU = nc_v dT \quad \Rightarrow \quad W_{AB} = \int_{T_2}^{T_1} nc_v dT = nc_v (T_1 - T_2)$$

BC : Isotherme :

$$dw = -pdV \quad \Rightarrow \quad W_{BC} = -\int_{V_B}^{V_C} \frac{nRT_1}{V} dV = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_C}$$

Adiabatique : $$dw = dU = nc_v dT \quad \Rightarrow \quad W_{CD} = \int_{T_1}^{T_2} nc_v dT = nc_v (T_2 - T_1)$$

Isotherme : $$dw = -pdV \quad \Rightarrow \quad W_{DA} = -\int_{V_D}^{V_A} \frac{nRT_2}{V} dV = nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_A}$$

b) $W = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_C} + nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_A}$

3) a) $Q_{AB} = Q_{CD} = 0$ car se sont des transformations adiabatiques

BC : Isotherme : $dw + dQ = dU = 0$ Transformation isotherme d'un gaz parfait.

$$dQ = -dW \quad \Rightarrow \quad Q_{BC} = -W_{BC} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_C} = Q_1$$

De même : $Q_{DA} = -W_{DA} = nRT_2 \ln \frac{V_A}{V_D} = Q_2$

b) dans le cas du cycle :

$$\Delta U = 0 \Rightarrow \quad W = -(Q_{BC} + Q_{DA}) = -(Q_1 + Q_2)$$

$$W = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_C} + nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_A}$$

4) Transformations adiabatiques : $Q_{AB} = Q_{CD} = 0 \longrightarrow \Delta S_{AB} = \Delta S_{CD} = 0$

Transformations isothermes : $dU = 0 \quad \Rightarrow dQ = -dW$;

$$dS = \frac{dQ}{T_S} = \frac{dQ^{rev}}{T} = \frac{pdV}{T} = \frac{nRdV}{V} \quad transformation\ \ BC: \ \ \Delta S_{BC} = nR\ln\frac{V_B}{V_C}$$

$$transformation\ \ DA: \ \ \Delta S_{DA} = nR\ln\frac{V_D}{V_A}$$

b) $\Delta S_{cycle} = \Delta S_{BC} + \Delta S_{DA}$

$$\left.\begin{array}{ll} T_A V_A^{\gamma} = T_B V_B^{\gamma} & T_2 V_A^{\gamma} = T_2 V_B^{\gamma} \\ T_C V_C^{\gamma} = T_D V_D^{\gamma} & T_1 V_C^{\gamma} = T_2 V_D^{\gamma} \end{array}\right\} \Rightarrow \left(\frac{V_A}{V_D}\right)^{\gamma} = \left(\frac{V_B}{V_C}\right)^{\gamma} \Rightarrow \frac{V_B}{V_C} = \frac{V_A}{V_D}$$

$$\Delta S_{BC} = nR\ln\frac{V_B}{V_C} = -\Delta S_{DA} = -nR\ln\frac{V_D}{V_A}$$

$\Delta S_{cycle} = 0$ $\qquad$ *transformation cyclique reversible*

5) le cycle est récepteur car W > 0 , deux cas se présentent

- pompe à chaleur

Dans ce cas

$$\frac{gain}{Dépense} = -\frac{Q_1}{W} = performance = p = \frac{Q_1}{(Q_2 + Q_1)}$$

- machine frigorifique

Dans ce cas

$$\frac{gain}{Dépense} = \frac{Q_2}{W} = efficacité = e = -\frac{Q_2}{(Q_2 + Q_1)}$$

b) relation de Clausius : $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$ $\qquad$ $\frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2}$

$$p = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \qquad\qquad e = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

6) au cours de la transformation BC la source 2 a échangée $\Delta S_2 = -\frac{Q_2^{rev}}{T_2} < 0$

au cours de la transformation DA la source 1 a échangée $\Delta S_1 = -\frac{Q_1^{rev}}{T_1} > 0$

b) $\Delta S_T = \Delta S_{système} + \Delta S_1 + \Delta S_2 = 0$,

Conclusion : le système et les deux sources forment un système isolé, puisque la transformation cyclique est réversible . $\Delta S_T = 0$

7) a transformation BC était isotherme, la nouvelle transformation est irréversible, puisque S est une fonction d'état :

$\Delta \mathbf{S_{BC}} = \Delta S_{BC} = nR\ln\frac{V_B}{V_C}$